

Собственная фотопроводимость в тонких эпитаксиальных пленках дисилицида хрома

© Н.Г. Галкин, А.В. Конченко, А.М. Маслов

Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690041 Владивосток, Россия

(Получена 3 декабря 1996 г. Принята к печати 28 января 1997 г.)

Исследованы спектральная и интегральная фотопроводимость в эпитаксиальных пленках дисилицида хрома на кремнии толщиной 1000 Å в диапазоне энергий $0.5 \div 1.6$ эВ при комнатной температуре. Обнаружено, что максимум фотопроводимости наблюдается при энергии фотонов 1.23 эВ, что соответствует области третьего межзонного перехода в дисилициде хрома с энергией $0.9 \div 0.95$ эВ. Проанализированы возможные причины слабого сигнала фотопроводимости в области края основного поглощения.

Дисилициды переходных металлов, обладающие полупроводниковыми свойствами, (CrSi_2 , $\beta\text{-FeSi}_2$, $\text{MnSi}_{1.73}$, ReSi_2) вызывают интерес как перспективные материалы для кремниевой планарной технологии. Много внимания было уделено вопросам гетероэпитаксии на кремнии [1,2], электрическим [3,4] и оптическим свойствам [4,5–7]. Однако фотоэлектрические свойства были исследованы лишь для тонких поликристаллических пленок дисилицида железа [5].

В данной работе приведены первые результаты исследования собственной фотопроводимости в тонких эпитаксиальных пленках дисилицида хрома (CrSi_2) А-типа на кремниевых подложках Si (111) и установлена взаимосвязь с зонной энергетической структурой CrSi_2 по данным теоретических расчетов из первых принципов и с экспериментальной зависимостью коэффициента поглощения от энергии, полученной из расчетов спектров поглощения и отражения системы (эпитаксиальная пленка CrSi_2)–(подложка Si).

Эпитаксиальные пленки CrSi_2 (0001) А-типа на Si (111) были выращены по методу затравочного слоя [2] с дорастиванием методом молекулярно-лучевой эпитаксии из двух источников в вакууме при остаточном давлении $3 \cdot 10^{-9}$ Тор [4]. Спектральные зависимости фотопроводимости и интегральная фотопроводимость эпитаксиальных слоев CrSi_2 регистрировались при комнатной температуре на тестовых структурах с двумя токовыми и двумя потенциальными омическими контактами с использованием галогеновой лампы, монохроматора МДР-3 с осветительной системой, системы модуляции и синхронизации световых пучков, Ge- и Si-фотодиодов, интерференционного и кремниевого светофильтров, синхронного усилителя с детектором и графопостроителя.

Спектральная зависимость собственной фотопроводимости σ_{ph} эпитаксиальной пленки CrSi_2 А-типа толщиной 1000 Å показана на рис. 1, а (кривая 1). Фотопроводимость начинает возрастать при энергиях фотонов выше 1.0 эВ, проходит два максимума (слабый при 1.1 эВ и сильный при 1.23 эВ) и затем уменьшается при энергиях фотонов выше 1.3 эВ. Попытки спектрально разрешить сигнал фотопроводимости при энергиях меньше 1.0 эВ не имели успеха. Однако интегральная

фотопроводимость в диапазоне энергий $0.50 \div 0.83$ эВ (область пропускания интерференционного светофильтра) была обнаружена для эпитаксиальных пленок дисилицида хрома различных толщин $300 \div 2000$ Å. При увеличении тока накала галогеновой лампы (J_L) величина фототока (I_{ph}) нелинейно возрастает (рис. 1, б). Поскольку толщина исследуемых пленок была достаточно малой, небольшая часть потока фотонов с энергиями $0.9 \div 1.1$ эВ проходила в кремниевую подложку (рис. 2, а, кривая 4), что могло вызвать фотопроводимость в кремнии. Для контроля возможного вклада кремния в сигнал фотопроводимости системы CrSi_2/Si спектр фотопроводимости чистой кремниевой подложки был также зарегистрирован (рис. 1, а, кривая 2). Так как формы кривых для кремния и системы CrSi_2/Si достаточно похожи, были проведены дополнительные эксперименты. Спектральные зависимости фотопроводимости кремния и эпитаксиальной пленки дисилицида хрома на кремнии регистрировались с использованием чистой пластины высокоомного ($150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) кремния в качестве светофильтра перед образцами (рис. 2, а, кривые 1 и 2). Видно, что наблюдается смещение максимумов фоточувствительности Si и пленки CrSi_2 на кремнии. Пропускание (T) кремниевого светофильтра также показано на рис. 2, а (кривая 4). Максимум фотопроводимости кремния в такой схеме регистрации сигнала расположен при энергии фотонов 1.07 эВ, когда пропускание светофильтра уменьшается только на 5% от максимума (рис. 2, а, кривые 2 и 4). Максимум фотопроводимости эпитаксиальной пленки CrSi_2 на Si наблюдается при 1.14 эВ, когда пропускание кремниевого светофильтра уменьшается на 29% (рис. 2, а, кривые 1 и 4). Следовательно, спектральная фоточувствительность эпитаксиальной пленки CrSi_2 выше при более высоких энергиях по сравнению с фоточувствительностью чистой кремниевой подложки. Поглощение кремниевого светофильтра (рис. 2, а, кривая 4) значительно меньше поглощения пленки CrSi_2/Si (рис. 2, а, кривая 3) при тех же энергиях ($1.0 \div 1.2$ эВ), вычисленного из спектров пропускания и отражения, поэтому интенсивность света, достигшего кремниевой подложки после прохождения пленки CrSi_2 , также мала. Таким образом, вклад кремниевой подложки в сигнал фотопроводимости в системе

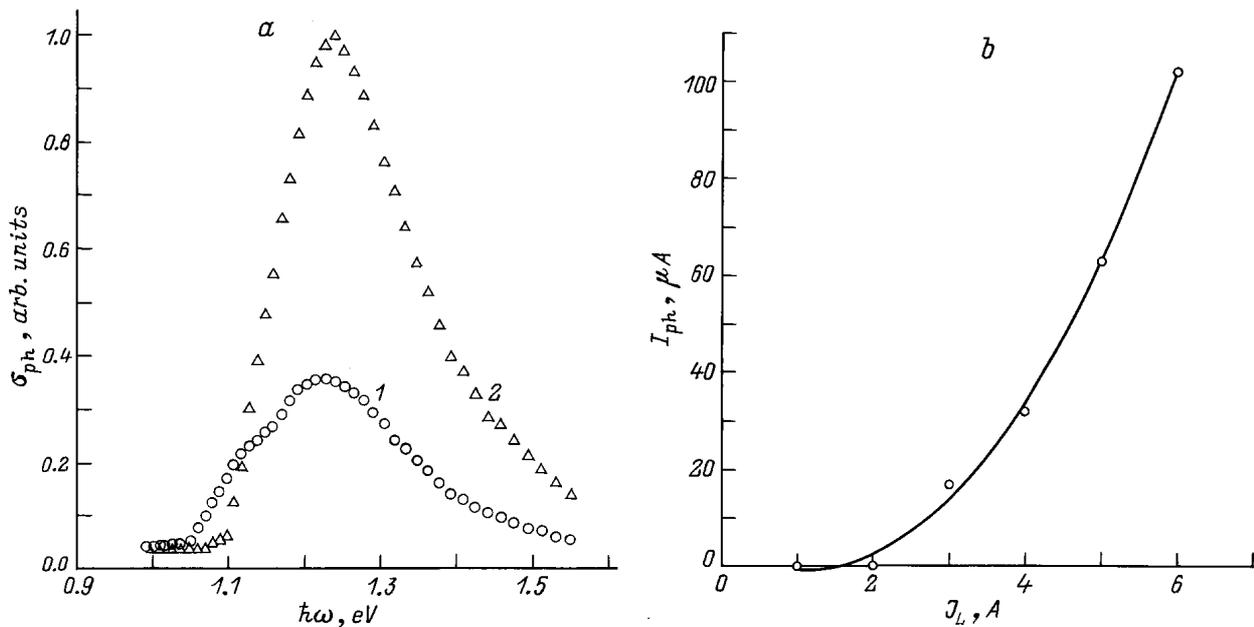


Рис. 1. *a* — спектры фотопроводимости σ_{ph} эпитаксиальной пленки дихлорида хрома на кремнии (1) и высокоомной кремниевой подложки (2) при комнатной температуре. *b* — зависимость интегрального фототока (I_{ph}) эпитаксиальной пленки дихлорида хрома на кремнии в диапазоне энергий $0.50 \div 0.83$ эВ от тока накала галогеновой лампы (J_L).

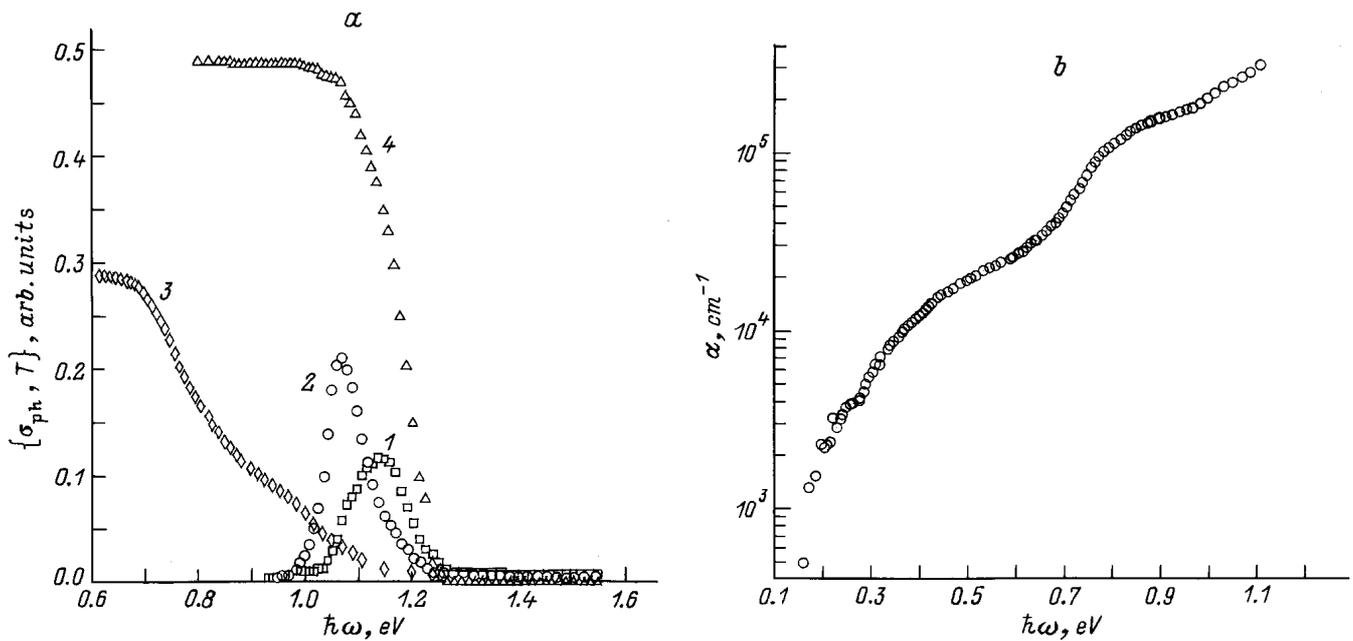


Рис. 2. *a* — спектры фотопроводимости σ_{ph} (1, 2) и пропускания T (3, 4) эпитаксиальной пленки дихлорида хрома на кремнии (1, 3) и высокоомной кремниевой подложки (2, 4) с использованием кремниевого светофильтра. *b* — спектральная зависимость коэффициента поглощения α эпитаксиальной пленки дихлорида хрома.

CrSi_2/Si является очень малой величиной и может быть заметным только при энергиях фотонов ниже 1.07 эВ. Следовательно, наблюдаемая спектральная зависимость фотопроводимости системы CrSi_2/Si (рис. 1, *a*, кривая 1) определяется в основном вкладом эпитаксиальной пленки CrSi_2 .

Спектральная зависимость коэффициента поглощения эпитаксиальной пленки CrSi_2 , рассчитанная с использованием двухслойной модели [8], представлена на рис. 2, *b*. Особенностью зонной энергетической структуры эпитаксиальной пленки CrSi_2 является наличие трех прямых межзонных переходов 0.34, 0.7 и 0.9 эВ [4, 8], что

не наблюдается обычно в полупроводниках групп A^{IV} , $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ [9]. Для эпитаксиальной пленки $CrSi_2$ A -типа также характерны пониженная комбинированная плотность состояний в области фундаментального поглощения по сравнению с плотностью состояний, дающей вклад в межзонные переходы при 0.7 и 0.9 эВ [8], и узкий энергетический диапазон перехода (0.3 ÷ 1.3 эВ) от минимальной комбинированной плотности состояний к максимальной [7,8].

Теоретические расчеты зонной энергетической структуры $CrSi_2$ из первых принципов в различных приближениях предсказывают формирование непрямого фундаментального межзонного перехода с большим разбросом энергий $E_g = 0.21 \div 0.38$ эВ и второго прямого межзонного перехода в диапазоне энергий $E_2 = 0.39 \div 0.47$ эВ [7,10,11]. Кроме того, по данным теоретических расчетов из первых принципов одной из работ [12] в $CrSi_2$ должен наблюдаться прямой межзонный переход при энергии 0.25 ÷ 0.26 эВ и второй прямой переход при энергии $E_2 = 0.48 \div 0.49$ эВ. Однако спектр отражения $CrSi_2$, рассчитанный из данных теоретических расчетов [7], сильно отличается от спектров отражения монокристаллов $CrSi_2$ [7], поликристаллических [6,7] и эпитаксиальных [8] пленок. Следовательно, теоретические расчеты из первых принципов дают в настоящее время достаточно противоречивые данные об основных межзонных переходах в зонной энергетической структуре $CrSi_2$ и не могут быть уверенно использованы при интерпретации спектральной зависимости фотопроводимости.

В условиях малой толщины пленки $CrSi_2$ и быстрого возрастания комбинированной плотности состояний в диапазоне энергий переходов 0.34 ÷ 1.3 эВ [7,8] следует ожидать смещение максимумов фоточувствительности в область более высоких энергий [13]. Подобная картина наблюдалась для спектральных зависимостей фотопроводимости в тонких поликристаллических пленках β - $FeSi_2$ на Si [5], когда длинноволновый край фотопроводимости находился при 1.0 эВ, а максимум фотопроводимости при 1.35 эВ. При этом ширина запрещенной зоны β - $FeSi_2$ составляет 0.87 эВ [5], а длинноволновому краю фотопроводимости соответствует значение коэффициента поглощения $\alpha = 1 \cdot 10^5$ см⁻¹. Для эпитаксиальной пленки $CrSi_2$ максимум спектральной чувствительности находится при 1.23 эВ, что соответствует коэффициенту поглощения $\alpha \approx 4 \cdot 10^5$ см⁻¹ (рис. 2, *b*). При толщине пленки $CrSi_2$ $d = 1000$ Å (или $1 \cdot 10^{-5}$ см) величина $\alpha d = 4$, что не противоречит условию наблюдения максимумов фотопроводимости для полупроводников $\alpha d \geq 1$ [9]. Интегральная фоточувствительность эпитаксиальной пленки $CrSi_2$ в области энергий 0.50 ÷ 0.83 эВ (рис. 1, *b*) подтверждает возникновение слабого сигнала фотопроводимости в области энергий, близких к краю собственного поглощения ($E_g = 0.34$ эВ). При увеличении толщины эпитаксиальных пленок $CrSi_2$ на Si до $(1 \div 3) \cdot 10^{-4}$ см можно ожидать смещение максимума спектральной фоточувствительности в область

энергий 0.6 ÷ 0.8 эВ. В предварительных экспериментах на эпитаксиальных пленках дисилицида хрома толщиной от 2000 до 8000 Å было обнаружено смещение основного максимума фотопроводимости в область энергий 1.18 ÷ 1.12 эВ.

Таким образом, спектральный диапазон собственной фотопроводимости эпитаксиальных пленок $CrSi_2$ A -типа на Si (111) толщиной 1000 Å охватывает диапазон энергий фотонов от 0.5 до 1.6 эВ, а в формировании сигнала фотопроводимости участвуют первых три прямых межзонных перехода с энергиями 0.34, 0.7 и 0.9 эВ, которым соответствует постепенное повышение комбинированной плотности состояний [8]. Наблюдаемый сдвиг максимума фоточувствительности в область энергий третьего межзонного перехода можно объяснить малой толщиной исследуемых пленок и особенностями спектральной зависимости плотности комбинированных состояний в эпитаксиальных пленках дисилицида хрома. Учитывая участие прямых межзонных переходов в процессе фотопроводимости, можно предположить возможность реализации излучательных переходов в эпитаксиальных пленках дисилицида хрома.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-02-16038-а).

Список литературы

- [1] J.M. Gay, P. Stocker, F. Rethore. *J. Appl. Phys.*, **73**, 8169 (1993).
- [2] N.I. Plusnin, N.G. Galkin, V.G. Lifshits. *Suif. Rev. Lett.*, **2**, 439 (1995).
- [3] F. Nava, T. Tien, K.N. Tu. *J. Appl. Phys.*, **57**, 2018 (1985).
- [4] N.G. Galkin, T.V. Velitchko, S.V. Skripka, A.B. Khrustalev. *Thin Sol. Films*, **280**, 211 (1996).
- [5] M.C. Bost, J.E. Mahan. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **4**, 1336 (1986).
- [6] M.C. Bost, J.E. Mahan. *J. Appl. Phys.*, **63**, 839 (1988).
- [7] V. Bellani, G. Guizzetti, F. Marabelli, A. Piaggi, A. Borghesi, F. Nava, V.N. Antonov, V.I. Antonov, O. Jepsen, O.K. Andersen, V.V. Nemoshkalenko. *Phys. Rev. B*, **46**, 9380 (1992).
- [8] N.G. Galkin, A.M. Maslov, A.V. Konchenko. *Thin Sol. Films* (1997) (to be published).
- [9] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника* (М., Мир, 1976).
- [10] L.F. Matheiss. *Phys. Rev. B*, **43**, 1863 (1991).
- [11] M.P.C. Krijn, R. Eppenda. *Phys. Rev. B*, **44**, 9042 (1991).
- [12] В.Е. Борисенко, Л.И. Иваненко, С.Ю. Никитин. *Микроэлектроника*, **21**, 69 (1992).
- [13] J.N. Humphrey. *Appl. Optics*, **4**, 665 (1965).

Редактор Л.В. Шаронова

Intrinsic photoconductivity in thin epitaxial chromium disilicide films

N.G. Galkin, A.V. Konchenko, A.M. Maslov

Institute of Automation and Control Processes,
Far Eastern Department of Russian Academy
of Sciences,
690041 Vladivostok, Russia

Abstract Spectral and integral photoconductivities in the epitaxial chromium disilicide films, that were grown on silicon substrates, have been studied in the photon energy range of $0.5 \div 1.6$ eV. The photoconductivity maximum, observed at 1.23 eV, corresponds to the third direct interband transition in chromium disilicide at $0.9 \div 0.95$ eV. The possible reasons of the weak photoconductivity signal in the region of fundamental absorption edge were analyzed.

Fax:(4232) 310452

E-mail: srn@iapu.marine.su